

MUSEO CIVICO DI ROVERETO

Atti del Workshop in geofisica

La Geofisica applicata alla Idrogeologia

Rovereto (Trento), 4 dicembre 2014

edizioni **osiride**

© Edizioni Osiride 2016 [378]
Via Pasqui 10, I-38068 Rovereto (TN)
Tel. 0464 422372 - Fax 0464 489854
www.osiride.it osiride@osiride.it

Fondazione Museo Civico di Rovereto
Borgo S. Caterina 41, I-38068 Rovereto (TN)
Tel. 0464 452800 - Fax 0464 439487
www.fondazionemcr.it museo@fondazionemcr.it

ISBN 978-88-7498-268-4

Le riproduzioni sono a cura degli autori.

INDICE

LORENZO CADROBBI, TOMAS GARBARI & ROBERTO LORENZI - Utilizzo della geofisica a supporto di interventi di stoccaggio acque nel sottosuolo. By-pass idraulico della condotta di derivazione con funzione di accumulo e decantazione del «Consorzio di Irrigazione terza Sponda: Cagnò, Revò, Cloz e Romallo»	pag. 3
LAURA BUSATO, JACOPO BOAGA, MARIA TERESA PERRI & GIORGIO CASSIANI - Metodologie non invasive per la caratterizzazione della Earth's Critical Zone	» 21
PIER LUIGI BRAGATO, DAMIANO PESARESI & MONICA SUGAN - Un'indagine multidisciplinare per caratterizzare boati causati da fenomeni idrogeologici: l'esperienza dell'OGS in Val Lapisina	» 43
PAOLO BAGGIO & MARIO NALDI - Modalità di interpretazione di alcuni modelli geoelettrici applicati alla ricerca e captazione di sorgenti e pozzi in ambito montano ...	» 51
ANTONIO MARIA BALDI, ALESSANDRO CIVELI, JOHNNY DE LUCA & STEFANO MENCARINI - L'evoluzione delle indagini geofisiche per lo studio delle strutture termali	» 71
LORENZO DE CARLO, RITA MASCIALE, MARIA CLEMENTINA CAPUTO, IVAN PORTOGHESE & MICHELE VURRO - Studio idrogeofisico per calibrare un modello idrologico afflussi-deflussi: il caso studio del Lago Alimini Piccolo (LE)	» 95
DIEGO BARBERO, DOMENICO ANTONIO DE LUCA, MARIA GABRIELLA FORNO, MANUELA LASAGNA & LORENZO MAGNEA - Stima della componente verticale della velocità della falda da profili termici in aree di ricarica di acquiferi: un'applicazione al Conoide di Lanzo (TO), Piemonte Nord Occidentale	» 109
LAURA BUSATO, GIORGIO CASSIANI, MARIA TERESA PERRI & JACOPO BOAGA - Metodologie non invasive per lo studio delle zone iporeica e ripariale	» 129
STEFANO DEL GHIANDA, GIANFRANCO MORELLI & MATTEO RUSSO - Nuovi sistemi wireless per tomografia elettrica per l'esplorazione di medio-grande profondità e applicazioni in campo idrogeologico	» 155
MAURIZIO GORLA, ALESSANDRO CIVELI, DAVIDE LO MONACO, CLAUDIO ROSSI & ROBERTO SIMONETTI - Caratterizzazione geofisica e isotopica del sottosuolo delle province di Milano e Monza/Brianza	» 169
MARTA CASTAGNA, GABRIELE CHIOGNA & OSCAR CAINELLI - Interpretazione dei dati di tomografia idraulica con il software SmartGeo per la caratterizzazione degli acquiferi	» 195
MICHÉLE LUISA VUILLERMIN & OSVALDO CARGNEL - Approccio metodologico e studio idrogeologico per il potenziamento dell'acquedotto di Gosaldo (Agordo-Belluno)	» 209
PIETRO ZANGHERI - Sviluppo delle conoscenze idrogeologiche. Quale ricaduta nel campo della gestione delle risorse idriche?	» 249

INDEX

LORENZO CADROBBI, TOMAS GARBARI & ROBERTO LORENZI - Use of geophysics in support of interventions of water storage in the subsoil. Hydraulic bypass for the conduct of derivation with accumulation and decanting function of the «Consorzio di Irrigazione terza Sponda: Cagnò, Revò, Cloz e Romallo»	page	3
LAURA BUSATO, JACOPO BOAGA, MARIA TERESA PERRI & GIORGIO CASSIANI - Non-invasive methodologies for the characterization of the Earth's Critical Zone	»	21
PIER LUIGI BRAGATO, DAMIANO PESARESI & MONICA SUGAN - Multidisciplinary investigation to characterize roars caused by hydrogeological phenomena: the OGS experience in Val Lapisina	»	43
PAOLO BAGGIO & MARIO NALDI - Interpretation of geoelectrical models for the finding and catchment of mountain springs and wells	»	51
ANTONIO MARIA BALDI, ALESSANDRO CIVELI, JOHNNY DE LUCA & STEFANO MENCARINI - The evolution of geophysical surveys for exploration of thermal structures	»	71
LORENZO DE CARLO, RITA MASCIARE, MARIA CLEMENTINA CAPUTO, IVAN PORTOGHESE & MICHELE VURRO - Hydrogeophysical approach to calibrate a hydrological model: the study case of Alimini Piccolo Lake (LE)	»	95
DIEGO BARBERO, DOMENICO ANTONIO DE LUCA, MARIA GABRIELLA FORNO, MANUELA LASAGNA & LORENZO MAGNEA - Estimating the vertical component of groundwater velocity from thermal profiles in aquifer recharge areas: an application to the Lanzo Fan, North Western Piedmont	»	109
LAURA BUSATO, GIORGIO CASSIANI, MARIA TERESA PERRI & JACOPO BOAGA - Non-invasive methodologies for the study of hyporheic and riparian zones	»	129
STEFANO DEL GHIANDA, GIANFRANCO MORELLI & MATTEO RUSSO - New wireless ERT systems for medium-deep investigation and related applications for hydrogeological purposes	»	155
MAURIZIO GORLA, ALESSANDRO CIVELI, DAVIDE LO MONACO, CLAUDIO ROSSI & ROBERTO SIMONETTI - Geophysical and Isotopic characterization of Milan and Monza/Brianza provinces' underground	»	169
MARTA CASTAGNA, GABRIELE CHIOGNA & OSCAR CAINELLI - Interpretation of hydraulic tomography data with SmartGeo for aquifers characterization	»	195
MICHÉLE LUISA VUILLERMIN & OSVALDO CARGNEL - Hydrogeological study and methodological approach to the enhancement of the aqueduct of Gosaldo (Agordo-Belluno)	»	209
PIETRO ZANGHERI - The development of hydrogeological knowledge. What does it actually mean in water management?	»	249

Stampato per i Tipi delle
Edizioni Osiride - Rovereto (TN) - Via Pasqui, 10
osiride@osiride.it
Finito di stampare il 30 novembre 2016

Printed in Italy

Mus. civ. Rovereto	Atti del Workshop in geofisica	4 dicembre 2014	109-127	2016
--------------------	--------------------------------	-----------------	---------	------

DIEGO BARBERO ⁽¹⁾, DOMENICO ANTONIO DE LUCA ⁽¹⁾, MARIA GABRIELLA FORNO ⁽¹⁾,
MANUELA LASAGNA ⁽¹⁾ & LORENZO MAGNEA ⁽²⁾

STIMA DELLA COMPONENTE VERTICALE DELLA VELOCITÀ DELLA FALDA DA PROFILI TERMICI IN AREE DI RICARICA DI ACQUIFERI: UN'APPLICAZIONE AL CONOIDE DI LANZO (TO), PIEMONTE NORD OCCIDENTALE

Abstract - DIEGO BARBERO, DOMENICO ANTONIO DE LUCA, MARIA GABRIELLA FORNO, MANUELA LASAGNA & LORENZO MAGNEA - Estimating the vertical component of groundwater velocity from thermal profiles in aquifer recharge areas: an application to the Lanzo Fan, North Western Piedmont.

We report on an application of an analytical method to determine the groundwater velocity in aquifer recharge areas. The methodology is based on the analysis of aquifer temperature measures collected in piezometers located in the Lanzo Fan (NW Piedmont). The development of a hydrogeological and physical model of the recharge study area by using analytical equations of heat transport by advection in a porous and completely saturated sediments, allows to estimate the vertical component of the Darcy velocity. This parameter is important for quantitative estimates of the time of aquifer recharge.

Key words: Lanzo Fan, Groundwater velocity, temperature profiles, aquifer recharge area, advective heat flow transport.

Riassunto - DIEGO BARBERO, DOMENICO ANTONIO DE LUCA, MARIA GABRIELLA FORNO, MANUELA LASAGNA & LORENZO MAGNEA - Stima della componente verticale della velocità della falda da profili termici in aree di ricarica di acquiferi: un'applicazione al Conoide di Lanzo (TO), Piemonte Nord Occidentale.

In questo lavoro viene proposta un'applicazione di un metodo analitico per determinare la velocità di deflusso della falda in aree di ricarica di acquiferi. La metodologia è basata sull'analisi di misure di temperatura dell'acquifero effettuate nei piezometri distribuiti nel Conoide di Lanzo (Piemonte nord occidentale). La messa a punto di un modello idrogeologico e fisico dell'area di ricarica in studio, support-

⁽¹⁾ Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino.

⁽²⁾ Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Torino.

tato da equazioni analitiche di trasporto del calore per avvezione in un mezzo poroso e completamente saturo, consente di effettuare una stima della componente verticale della velocità di Darcy. Tale parametro è importante per ottenere stime quantitative sul tempo necessario per la ricarica degli acquiferi stessi.

Parole chiave: Conoide di Lanzo - Velocità di deflusso delle acque sotterranee - Profili di temperatura - Area di ricarica degli acquiferi - Trasporto di calore per avvezione.

1. INTRODUZIONE

Nelle aree di ricarica degli acquiferi, la determinazione della componente verticale della velocità della falda attraverso metodologie geotermiche è molto importante per la valutazione e la protezione delle risorse idriche sotterranee. Il calcolo della velocità della falda permette infatti di effettuare stime quantitative sul tempo necessario per la ricarica degli acquiferi stessi. La metodologia qui proposta può essere anche adottata con altre finalità, quali ad esempio la dispersione di sostanze inquinanti negli acquiferi in cui è fondamentale conoscere la velocità di deflusso della falda.

L'area oggetto di studio corrisponde al Conoide di Lanzo drenato dal F. Stura di Lanzo. Questo imponente apparato, con estensione complessiva di circa 300 km², si sviluppa nel settore centrale della Pianura Padana piemontese allo sbocco delle Valli di Lanzo (Fig. 1). Parte di tale apparato rappresenta un'importante area di potenziale ricarica dell'acquifero piemontese settentrionale per quanto riguarda sia le falde superficiali che quelle profonde. In tale area è stata effettuata una stima quantitativa della componente verticale della velocità della falda superficiale attraverso l'analisi di profili di temperatura elaborati da misure termometriche in pozzi per acqua. I pozzi esaminati si sviluppano interamente all'interno dell'acquifero superficiale: pertanto, dall'analisi dei dati termometrici raccolti, è possibile evidenziare una non trascurabile componente verticale della velocità della falda superficiale.

L'analisi descritta è supportata da un modello analitico riguardante una soluzione particolare dell'equazione del trasporto del calore per diffusione (conduzione e convezione) all'interno di un mezzo poroso e completamente saturo. Il metodo proposto consente di pervenire a un risultato attendibile della componente verticale della velocità di flusso con tempi e costi notevolmente ridotti rispetto ai tradizionali.

2. ASSETTO GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO

Il Conoide di Lanzo con estensione di circa 300 km² deve la sua morfologia alla migrazione laterale del F. Stura di Lanzo. Esso mostra uno sviluppo altimetrico complessivo compreso tra 550 m e circa 210 m s.l.m. Da un'analisi morfologica, appare evidente che esso non corrisponde ad un'unica superficie con inclinazione

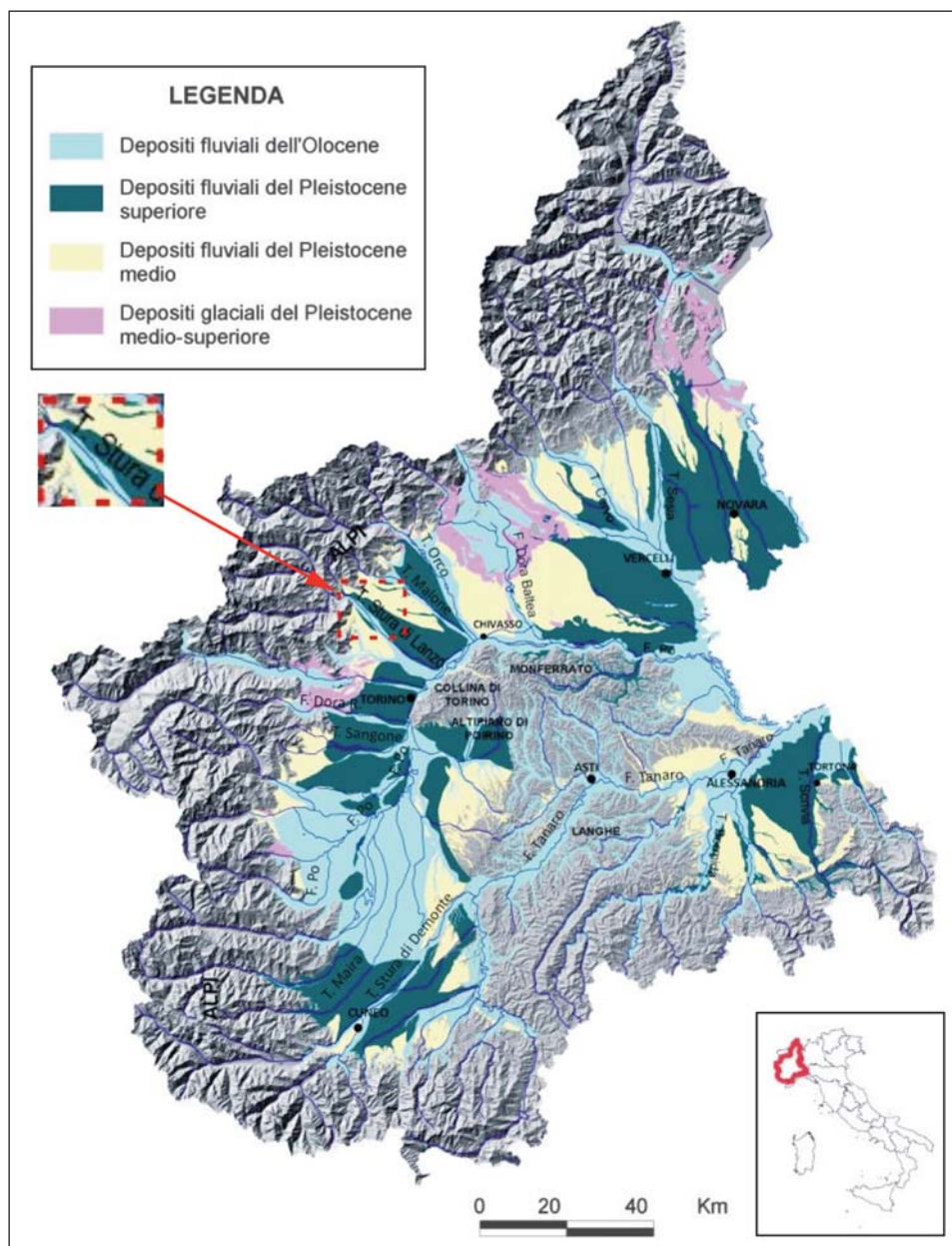


Fig. 1 - Distribuzione dei depositi quaternari in Piemonte, al di sopra del substrato (in grigio), con indicazione dell'area di studio (area tratteggiata).

costante, ma a diverse superfici distribuite a diversa altezza, degradanti verso il settore centrale e separate da scarpate con altezze comprese tra alcuni metri e alcune decine di metri. Il conoide, che assume pertanto una tipica morfologia terrazzata, appare dissecato da numerosi corsi d'acqua, dei quali i principali sono il F. Stura di Lanzo, impostato con direzione NW-SE nel settore centrale, e i suoi affluenti, in particolare il T. Ceronda, impostato al margine occidentale con andamento essenzialmente N-S, il T. Malone, impostato al margine nordorientale con andamento NW-SE e altri corsi d'acqua minori tra cui il T. Fandaglia, il T. Banna, il T. Fisca e il Rio San Giovanni. Le superfici terrazzate che si sviluppano a quote più elevate, corrispondono alle unità più antiche, e sono distribuite nei settori a monte, più esterni; invece, le superfici terrazzate presenti a quote inferiori, più recenti, sono distribuite nei settori a valle e più interni del conoide.

In particolare, il settore centrale del conoide, in cui ricadono i pozzi oggetto delle misure termometriche, è delimitato lateralmente da due superfici terrazzate, sospese tramite scarpate con altezze di alcune decine di metri. Tali scarpate sono riconducibili ad episodi erosivi di approfondimento del F. Stura di Lanzo entro i depositi fluviali depositati in precedenza dallo stesso, fino a intercettare i sedimenti più antichi, che costituiscono il substrato su cui poggiano i sedimenti fluviali rappresentati dalla successione "villafranchiana". L'approfondimento del reticolato idrografico è da mettere in relazione al concomitante e generalizzato sollevamento del settore alpino.

Recenti indagini geologiche riguardanti il settore destro del Conoide di Lanzo hanno segnalato, al di sopra delle Sabbie di Asti, una potente successione "villafranchiana", coperta da una più esigua coltre di depositi fluviali costituenti un insieme di terrazzi (FORNO *et alii*, 2009).

Le Sabbie di Asti, riconoscibili nelle stratigrafie dei sondaggi di pozzi molto profondi, sono rappresentate da sabbie fini di colore giallastro con stratificazione piano-parallela, deposte in ambiente marino litorale e riferibili allo Zancleano (BORTOLAMI *et alii*, 1969, 1970; BALESTRO *et alii*, 2009).

All'interno della sovrastante successione "villafranchiana", riconoscibile nella maggior parte dei sondaggi e affiorante nelle incisioni fluviali più profonde, è stata riconosciuta un'importante superficie erosionale, sottolineata localmente da un paleosuolo molto evoluto, che ne ha permesso la differenziazione in due distinti complessi sedimentari sovrapposti. Il "Complesso Inferiore" (Piacenziano) è costituito essenzialmente da silt, contenenti sporadici resti vegetali fossili, con subordinate intercalazioni ghiaiose: questi sedimenti appaiono sensibilmente consolidati e deformati. Il "Complesso Superiore" (Calabrian) è invece rappresentato prevalentemente da ghiaie minute con ridotte intercalazioni di sabbie silteose, prive di resti fossili (FORNO *et alii*, 2009).

Infine, i sovrastanti sedimenti fluviali costituiscono una successione terrazzata caratterizzata da inclinazione progressivamente minore dal tratto apicale del conoide a quello distale. In corrispondenza dei terrazzi sviluppati nei settori più elevati, a

quote comprese tra 550 m a monte e 390 m a valle su cui sono edificati gli abitati di Fiano e Balangero, si riconoscono i sedimenti fluviali più antichi, sensibilmente alterati (Pleistocene medio) e caratterizzati da una colorazione rossa intensa, da una forte cementazione degli ossidi di ferro e da una tessitura prevalentemente argillosa: essi sono rappresentati da ciottoli profondamente disgregati e con completa lisciviazione dei carbonati. Infine, su questi depositi si sviluppa una discontinua e sottile copertura di loess eolico (FORNO *et alii*, 2009).

Nei settori laterali più interni, a quote comprese tra 410 m e 280 m, su cui sorgono gli abitati di Vauda C.se e il Parco di la Mandria, si osservano sedimenti di età intermedia (Pleistocene medio) interessati da sensibile alterazione, anche se minore rispetto ai sedimenti precedenti, caratterizzati da una colorazione bruno-rossastra, da notevole cementazione da parte degli ossidi di ferro, da una tessitura sensibilmente argillosa: contengono ciottoli disgregati e mostrano una completa lisciviazione dei carbonati (FORNO *et alii*, 2009).

La porzione centrale più depressa del conoide, a quote comprese tra 430 m a monte e 210 m a valle, corrisponde all'estesa pianura su cui si localizzano gli abitati di Ciriè, Mathi, Nole, San Maurizio C.se, Caselle T.se, Volpiano, Settimo T.se, si rinvencono depositi di età più recente (Pleistocene superiore) caratterizzati da colore bruno-giallastro, matrice prevalentemente sabbiosa, ciottoli ancora integri e contenuto carbonatico variabile, indicativi di una modesta alterazione pedogenetica. Le misure termometriche oggetto di studio riguardano queste due ultime porzioni del conoide.

I depositi fluviali recenti (Olocene) affiorano in prossimità delle incisioni dei corsi di acqua sopra descritti e sono rappresentati prevalentemente da sedimenti ghiaioso-sabbiosi.

Per quanto concerne l'assetto idrogeologico nel Conoide di Lanzo si può individuare un acquifero di tipo libero, con spessore massimo di circa 50 metri, ospitato nei depositi fluviali ghiaiosi delle diverse unità, la cui permeabilità è ridotta da un alto tenore in argilla e una forte cementazione da parte degli ossidi di ferro a seguito della sensibile pedogenesi.

Al di sotto di questo primo acquifero, è presente un acquifero profondo corrispondente a un sistema multifalda in pressione, ospitato all'interno dei livelli ghiaiosi riferibili alla successione "villafranchiana" (Fig. 2). Entro tale successione, dal punto di vista idrogeologico è possibile distinguere un primo acquifero produttivo che si sviluppa all'interno di sedimenti ghiaioso-sabbiosi, riferibili al Complesso Superiore della successione "villafranchiana", e un acquifero confinato, più profondo, rappresentato da corpi ghiaiosi permeabili afferenti al Complesso Inferiore della successione "villafranchiana" (DE LUCA *et alii*, 2007). Infine, è presente un acquifero molto profondo, ospitato all'interno della successione pliocenica marina rappresentata dalle Sabbie di Asti (Fig. 2).

La superficie piezometrica dell'acquifero superficiale, con gradiente idraulico variabile da 1% in prossimità dell'apice del conoide a 0.1% nei settori distali, mo-

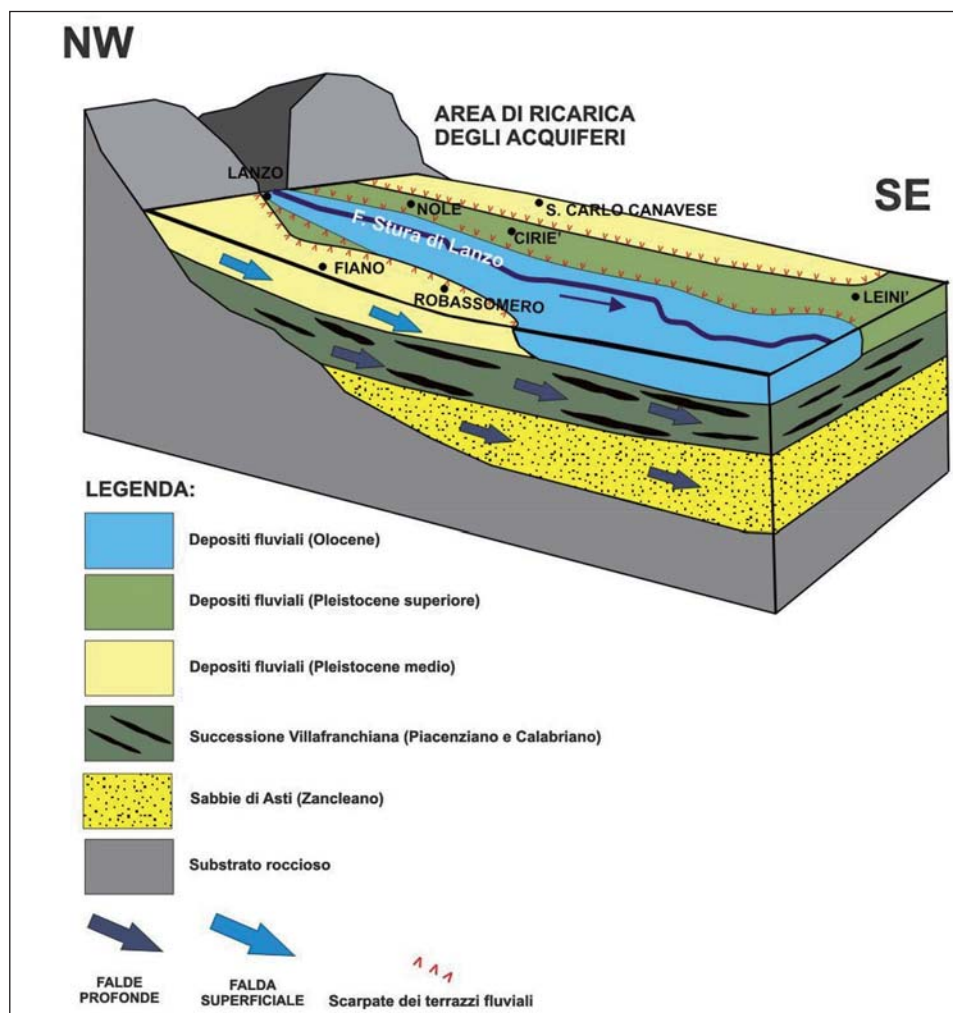


Fig. 2 - Sezione idrogeologica semplificata, con l'indicazione della direzione media di deflusso delle acque sotterranee.

stra un gradiente simile a quello della superficie topografica. La zona di ricarica del serbatoio di pianura è essenzialmente rappresentata dal tratto prossimale dei conoidi alpini, specie dove costituiti da sedimenti grossolani con elevata permeabilità: un settore del Conoide di Lanzo può rappresentare quindi un'importante area di ricarica degli acquiferi profondi, utilizzati per scopi idropotabili in particolare dalla Città di Torino. La ricarica dell'acquifero superficiale è favorita dalla permeabilità dei sedimenti, dalla presenza di corsi d'acqua alimentanti e dalla componente verticale del gradiente idraulico.

3. MODELLI ANALITICI DI TRASPORTO DEL CALORE

Le temperature nei primi 100 metri del sottosuolo, sono influenzate prevalentemente da due fattori: a) quello climatico, connesso alle variazioni della temperatura durante l'anno: nel corso delle stagioni le oscillazioni termiche si propagano nel sottosuolo interessandone i depositi più superficiali attraverso processi di convezione aria-suolo e di conduzione; b) quello idrogeologico, connesso alla presenza della falda: in questo caso i meccanismi di trasferimento di calore sono dovuti a processi di avvezione e conduzione.

3.1 Trasporto del calore per conduzione: effetto climatico

L'equazione differenziale alle derivate parziali del secondo ordine, che descrive la propagazione del calore per conduzione e per trasferimento termico per convezione aria-suolo nella sola direzione verticale z (1), fornisce, tra le altre, soluzioni oscillanti rappresentative delle oscillazioni stagionali (2a e 2b). In questa equazione le oscillazioni della temperatura, per via del termine esponenziale, tendono progressivamente a smorzarsi in profondità fino a raggiungere un andamento asintotico, con valore di temperatura circa costante $T = T_0$ (Fig. 3). L'espressione dell'equazione è

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

Avendo posto, $\frac{k}{\rho c} = \alpha \text{ (m}^2 \text{ s}^{-1})$ ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$), coefficiente di diffusione termica, dove k rappresenta la conducibilità termica del terreno ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), mentre ρ rappresenta la densità della matrice solida (terreno) (kg m^{-3}) ed infine c il calore specifico della matrice solida (terreno) ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$).

$$T(z, t) = T_0 + A e^{-z \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}} \cos[w(t - z \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}})] \quad (2a)$$

Ponendo ora, $\gamma = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}$ si ottiene:

$$T(z, t) = T_0 + A e^{-\gamma z} \cos(\omega t - \gamma z) \quad (2b)$$

Nell'Eq. (2), A rappresenta l'ampiezza dell'oscillazione di temperatura, T_0 rappresenta il valore medio di temperatura, α è il coefficiente di diffusione termica, γ è la costante di smorzamento, ω è la pulsazione entro il periodo di oscillazione considerato t , $\omega = 2\pi / t$. L'Eq. (2) rappresenta la soluzione analitica della (1) e descrive che la variazione di temperatura nel sottosuolo è una funzione sinusoidale la cui ampiezza decresce all'aumentare della profondità.

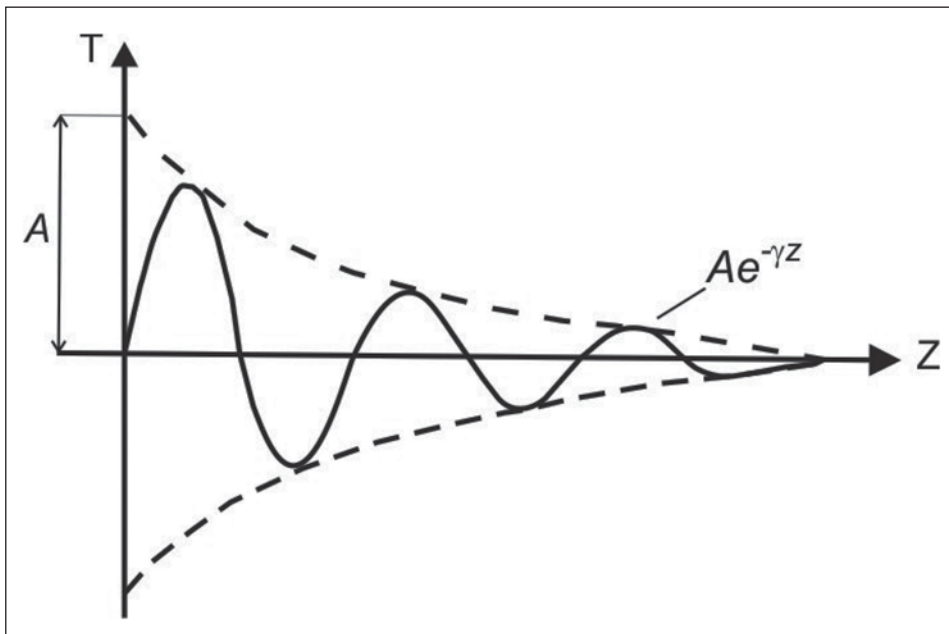


Fig. 3 - Il trasferimento di calore per conduzione nel sottosuolo a partire dalla superficie topografica è descritto da una funzione sinusoidale smorzata.

3.2 Trasporto del calore nell'acquifero

L'equazione differenziale alle derivate parziali che descrive il trasporto di calore per diffusione (conduzione e avvezione) attraverso un mezzo isotropo, omogeneo, caratterizzato da strati piani e paralleli, poroso e completamente saturo è la seguente:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + A_0 - \nabla \cdot (\rho_w c_w v_w T) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

Essendo:

T = temperatura per ogni punto al tempo t ($^{\circ}\text{C}$)

c = calore specifico della matrice solida (terreno) ($\text{J kg}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

ρ = densità della matrice solida (terreno) (kg m^{-3})

k = conducibilità termica del terreno ($\text{W m}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

v_w = velocità dell'acqua (m s^{-1})

c_w = calore specifico dell'acqua ($\text{J kg}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

ρ_w = densità dell'acqua (kg m^{-3})

t = tempo (s)

A_0 = produzione di calore radiogenico nel volume elementare del mezzo durante l'unità di tempo

Al primo membro dell'Eq. (3), il primo termine descrive la propagazione del calore per conduzione, il secondo termine tiene conto della produzione di calore radiogenico, infine il terzo termine descrive il trasporto di calore per filtrazione di acqua attraverso un mezzo poroso.

Se si considera l'equazione unidimensionale alle derivate parziali di diffusione del calore che descrive il movimento di flusso d'acqua verticale e parallelo al flusso di calore conduttivo con l'approssimazione che la velocità sia uniforme, $\nabla \cdot \mathbf{v}_w = 0$, e se si trascura la produzione di calore radiogenico, in ragione delle limitate profondità d'indagine che riguardano la presente ricerca e dell'assenza nell'area di studio di campi geotermici e vulcanici, l'Eq. (3) si riduce alla seguente relazione:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \rho_w c_w v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

essendo:

z = coordinata cartesiana lungo cui avviene il movimento del fluido

v_z = componente verticale della velocità dell'acqua (m s^{-1})

Se si considerano poi condizioni stazionarie, ovvero per $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$, con z e v_z positivi per profondità crescenti, l'Eq. (4) si riduce a

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \rho_w c_w v_z \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

la cui soluzione generale è del tipo

$$T(z) = c_1 e^{\frac{\zeta}{2} z} + c_2 \quad (6)$$

avendo definito $\zeta = (\rho_w c_w v_z) / k$.

BREDEHOEFT & PAPADOPULOS (1965) hanno fornito una soluzione analitica all'Eq. (5) che consente di determinare i valori delle costanti c_1 e c_2 dell'Eq. (6) per un flusso di acqua verticale stazionario in un mezzo omogeneo e isotropo e saturo con le seguenti condizioni al contorno:

$$T_z = T_0 \text{ per } z = 0 \quad (7)$$

$$T_z = T_L \text{ per } z = L \quad (8)$$

dove

T_z = temperatura alle varie profondità

T_0 = temperatura più superficiale (per $z = 0$)

T_L = temperatura più profonda (per $z = L$)

Inizialmente il modello era stato sviluppato per analizzare i profili di temperatura attraverso strati confinati (acquiferi semipermeabili) ma poi il metodo è stato applicato da diversi autori in diversi contesti geologici ad esempio acquiferi costieri, ambienti glaciali (si veda ad esempio CARTWRIGHT, 1970; TANIGUCHI *et alii*, 1993; BOYLE & SALEEM, 1979) e applicandolo a diversi problemi unidimensionali in cui si assume che la temperatura sia costante alle estremità del sistema.

La soluzione dell'Eq. (5) con le condizioni al contorno 7 e 8 sopra descritte è

$$\frac{T_z - T_0}{T_L - T_0} = f(\beta, z/L) = \frac{e^{\beta z/L} - 1}{e^\beta - 1} \quad (9)$$

da cui
$$T(z, 0) = T_0 + (T_L - T_0) \frac{1 - e^{-(\beta z/L)}}{1 - e^{-\beta}} \quad (10)$$

avendo definito
$$\beta = Pe = \frac{\rho_w c_w v_z L}{k} \quad (11)$$

essendo β un parametro adimensionale, noto in letteratura come numero di Péclet Pe , positivo o negativo a seconda che v_z sia diretto verso l'alto o verso il basso rispettivamente. Esso esprime il rapporto tra il calore trasferito per avvezione all'interno di un mezzo poroso e quello trasferito per conduzione. Quando $Pe \gg 1$ prevale la componente avveviva, viceversa per $Pe \ll 1$ prevale la componente conduttiva. L rappresenta lo spessore di acquifero permeato saturo in cui si ha il flusso verticale sia idrico che termico. Dalla determinazione del parametro β si può ricavare il valore della componente verticale e della velocità v_z definita nel seguente modo

$$v_z = \frac{\beta k}{\rho_w c_w L} \quad (12)$$

BREDEHOEFT & PAPADOPULOS (1965) hanno determinato i valori della funzione $f(\beta, z/L)$ attraverso un metodo grafico (Fig. 4) per diversi valori del numero di Péclet β . Si osserva che β è direttamente correlato alla curvatura del profilo di temperatura – profondità. Le curve in Fig. 4 descrivono la variazione di temperatura in un mezzo poroso in cui vi è filtrazione verticale d'acqua. In particolare $\beta = 0$ indica un flusso d'acqua in regime puramente conduttivo, in un mezzo isotropo e in condizioni stazionarie in cui $v_z = 0$: in queste condizioni si registra un profilo di temperatura lineare con la profondità. Invece, in presenza di movimenti d'acqua il profilo di temperatura non è lineare, e le curve del grafico, mostrano concavità o convessità a seconda che la direzione di movimento del moto di filtrazione d'acqua sia verso l'alto o verso il basso. Infine, poiché β è proporzionale a v_z (Eq. 12), la curvatura diviene più pronunciata all'aumentare della velocità v_z .

YALCIN & DULMU (1998) hanno osservato che, per $\beta > 4$, e $-\beta \cong 0$ per cui l'Eq. 9 può essere riscritta nel seguente modo

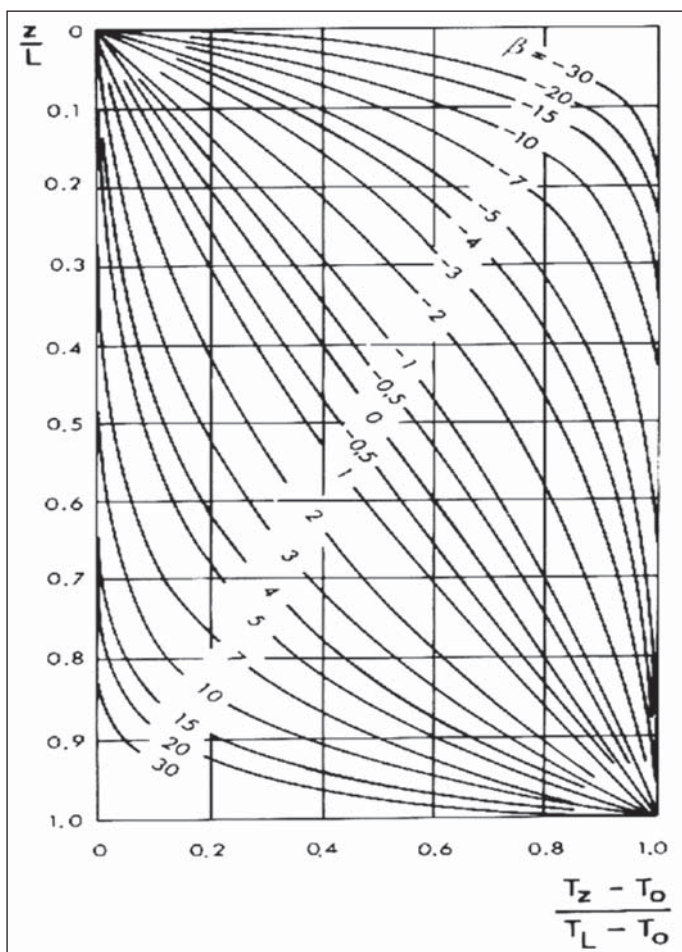


Fig. 4 - Curve della funzione $f(\beta, z/L)$ proposte da BREDEHOEFT & PAPADOPULOS (1965).

$$1 - \frac{T_z - T_0}{T_L - T_0} = e^{-(\beta z/L)} \quad (13)$$

da cui si ha $\frac{\beta z}{L} = \ln \frac{T_L - T_0}{T_L - T_z}$ che combinata con l'Eq. 13 consente di ricavare l'espressione della velocità

$$v_z = \frac{k}{\rho_w c_w z} \ln \frac{T_L - T_0}{T_L - T_z} \quad (14)$$

4. ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL METODO

4.1 *Modello idrogeologico e fisico*

In relazione al contesto geologico e morfologico dell'area di ricarica in studio, è stato elaborato un modello idrogeologico e fisico del trasporto del calore nel sottosuolo. Nell'area in esame si possono individuare due principali acquiferi: quello superficiale con spessore massimo di 50 m, ospitato nei depositi fluviali, e quello multifalda, profondo, ospitato nella successione villafranchiana (Fig. 5A). Le principali leggi fisiche che descrivono il trasporto di calore nel sottosuolo e in particolare nell'acquifero superficiale, oggetto del nostro studio, sono schematizzate nel modello in Fig. 5B. A partire dalla superficie topografica, dove avviene trasferimento di calore per convezione all'interfaccia aria – suolo e prevalentemente per conduzione entro la zona non satura, il profilo di temperatura (linea rossa in figura) è descritto da una funzione sinusoidale del tempo, rappresentativa delle variazioni di temperatura giornaliere e stagionali, che si smorza via via in profondità in ragione del termine esponenziale (si veda l'Eq. 2). All'interno della zona satura, la propagazione dell'onda termica è descritta oltre che dalla componente conduttiva anche dalla componente avvetiva connessa al trasporto di calore della falda. Il profilo di temperatura a partire dalla superficie piezometrica mostrerà ancora oscillazioni riconducibili alla penetrazione del disturbo termico stagionale entro i primi metri di acquifero per poi regolarizzarsi per via dello smorzamento (si veda l'Eq. 2) e assumere così l'andamento descritto dall'Eq. 10. L'Eq. 10 descrive il trasporto di calore in condizioni stazionarie, dove $z = 0$ individua la superficie piezometrica a cui corrisponde $T = T_0$, mentre $z = L$ indica lo spessore di acquifero permeato saturo e, nel caso specifico, a $z = L$ corrisponde la base dell'acquifero superficiale con $T = T_L$.

4.2 *Registrazioni termometriche e analisi dati dei profili termici*

I dati di temperatura sono stati raccolti nell'ambito di una campagna termometrica condotta nella rete di monitoraggio dei piezometri in primavera e in autunno del 2009 (BALSOTTI *et alii*, 2009) attraverso l'introduzione di una sonda multiparametrica in grado di registrare la temperatura dell'acqua con sensibilità pari al centesimo di grado.

I piezometri in cui sono state raccolte le misure sono ubicati presso Leinì, Caselle Torinese, San Maurizio Canavese, Venaria e Volpiano e hanno una lunghezza media di 20 metri e massima di circa 50 metri (Fig. 6).

I profili di temperatura delle colonne d'acqua dei pozzi esaminati evidenziano per i primi metri di sottosuolo fluttuazioni di temperatura, la cui ampiezza decresce progressivamente con la profondità (si veda Eq. 2), e compatibili con le oscillazioni stagionali, per poi regolarizzarsi e assumere un andamento lineare, compatibile con un moto di filtrazione d'acqua (Fig. 7).

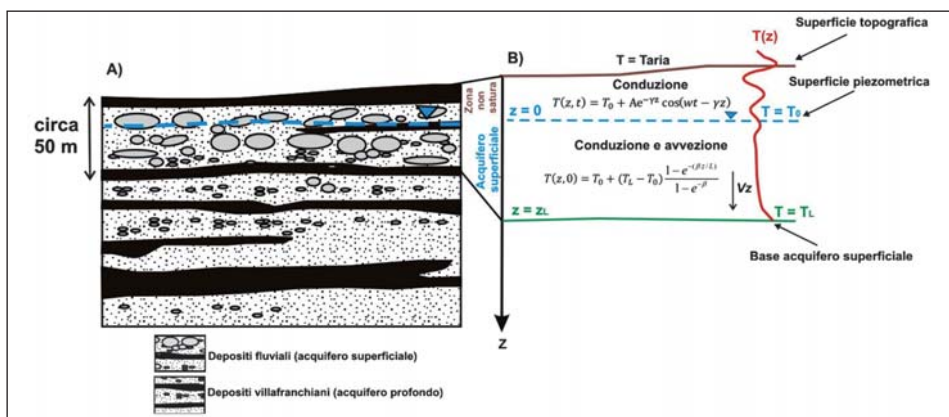


Fig. 5 - Modello idrogeologico (A) e fisico (B) del trasporto del calore dell'acquifero superficiale nel Conoide di Lanzo.

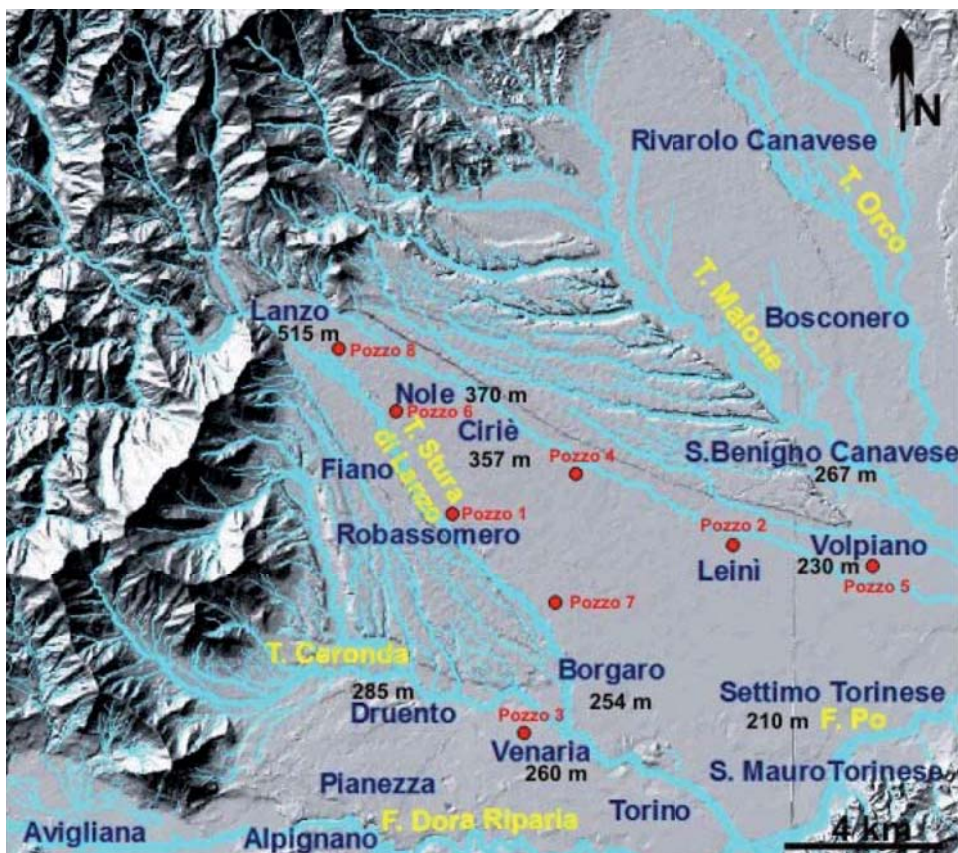


Fig. 6 - Ubicazione dei piezometri di misura.

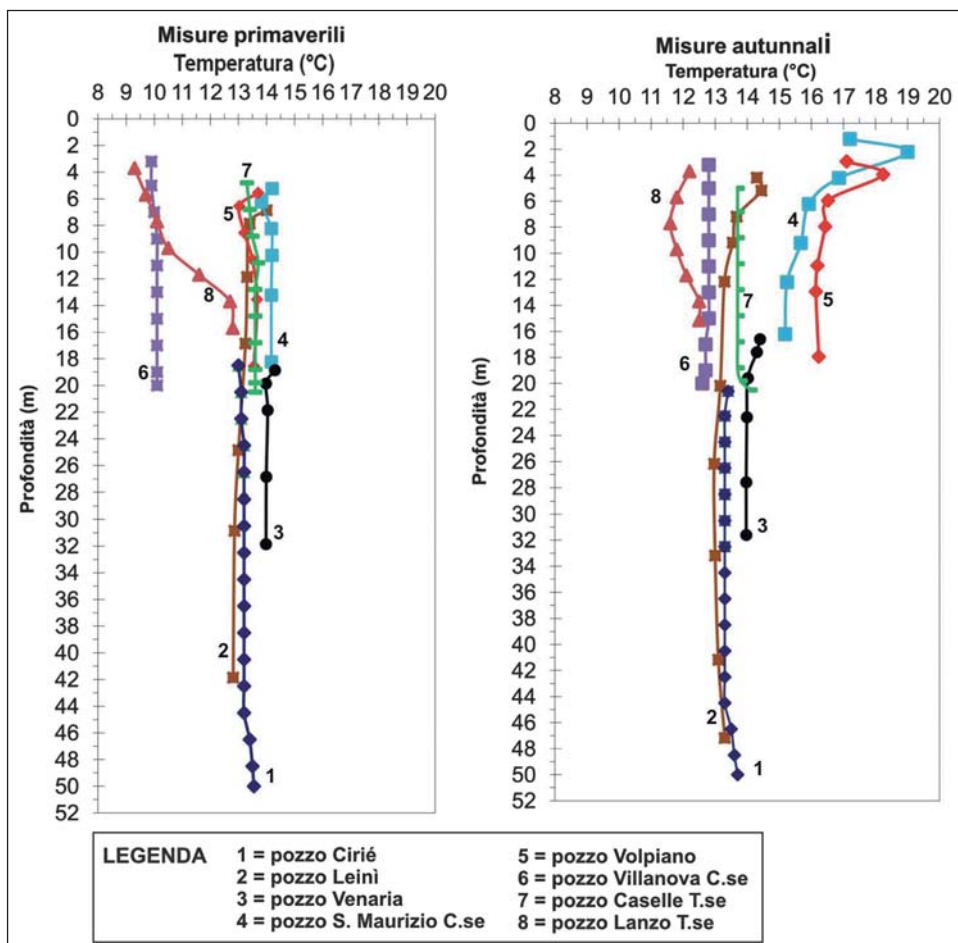


Fig. 7 - Profili di temperatura primaverili e autunnali.

Diversi autori (ANDERSON, 2005; BLASCH *et alii*, 2007; NIMMO *et alii*, 2005) riferiscono che in assenza di disturbo connesso sia all'effetto climatico stagionale che ai movimenti d'acqua per filtrazione, ovvero in condizioni puramente conduttive, il profilo termico è caratterizzato da un andamento lineare con inclinazione compatibile con la conducibilità termica degli strati di terreno attraversati; invece, in presenza di flussi d'acqua il profilo di temperatura mostra un profilo tipicamente non lineare ma assume un andamento concavo o convesso in relazione alla direzione del flusso d'acqua verticale. In prossimità delle aree di ricarica degli acquiferi il profilo di temperatura assume tipicamente un andamento concavo mentre in quelle di drenaggio il profilo di temperatura assume un andamento convesso. Più nel dettaglio, in aree

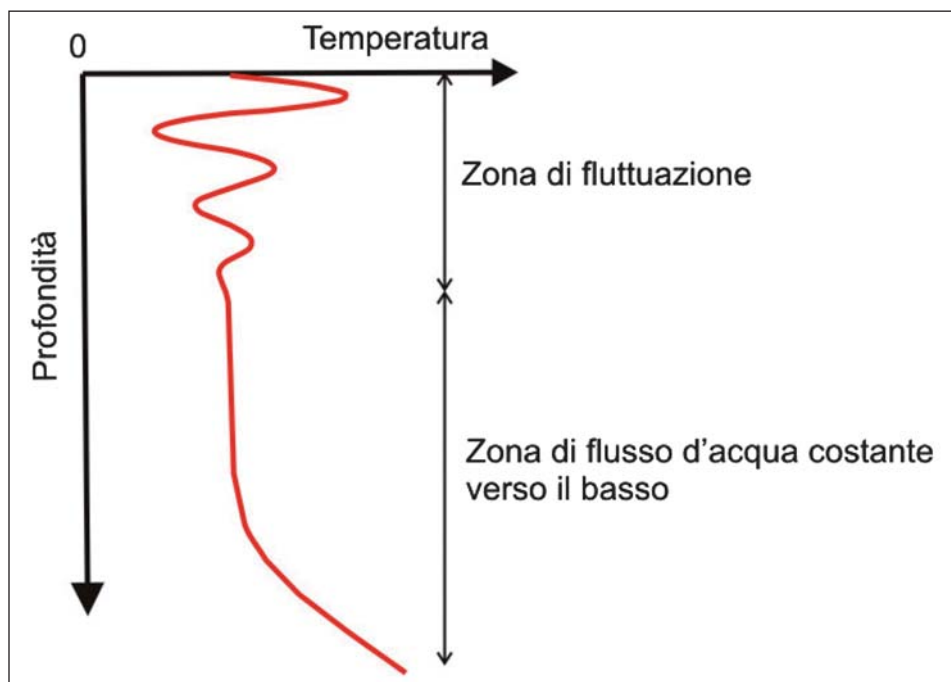


Fig. 8 - Profilo teorico di temperatura in un mezzo geologicamente omogeneo e in falda superficiale in area di ricarica.

di ricarica di acquiferi, il profilo di temperatura è caratterizzato nei primi metri di profondità da un andamento sinusoidale, riconducibile all'effetto termico stagionale, per poi assumere un andamento concavo con raggio di curvatura progressivamente più pronunciato in ragione dell'alimentazione in falda (Fig. 8).

4.3 Risultati

4.3.1 Determinazione della conducibilità termica equivalente verticale

Ai fini della determinazione della componente verticale della velocità v_z , così come definita nell'Eq. 14, occorre calcolare la conducibilità termica equivalente verticale K_0 per le colonne stratigrafiche dei pozzi presi in esame. L'analisi tessiturale delle stratigrafie dei pozzi, ha consentito di individuare le principali litologie permettendo di elaborare un modello geologico semplificato del sottosuolo, e suddiviso in strati litologicamente omogenei. Associando i valori di conducibilità termica K per le diverse litologie di terreni, si è potuto assegnare il valore di conducibilità termica più rappresentativo a ciascun strato litologicamente omogeneo. Dal confronto dei dati di letteratura, si può constatare che le principali variazioni di conducibilità termica

sono prevalentemente da correlare con la presenza o meno di fluidi che saturano i terreni piuttosto che con la natura tessiturale.

Considerando quindi una colonna stratigrafica costituita da N strati litologicamente differenti aventi spessore B_i e conducibilità termica K_i , con $i = 1 \dots n$ con $n \in \mathbb{N}$ (Fig. 10), il valore della conducibilità termica equivalente verticale K_z dell'intera colonna stratigrafica del pozzo può essere così espressa (15):

$$K_z = \frac{\sum_{i=1}^N B_i}{\sum_{i=1}^N \frac{B_i}{K_i}} \quad (15)$$

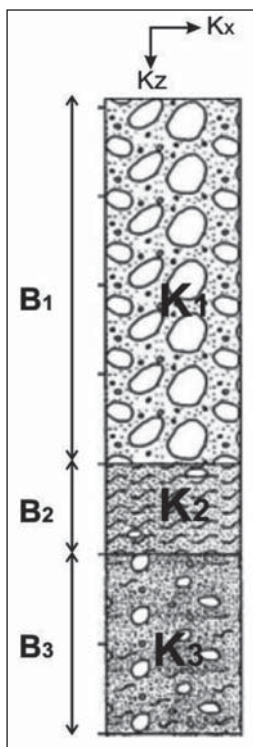


Fig. 9 - Schema di colonna stratigrafica per il calcolo di K_z .

In Tab. 1 sono riportati i valori di K_z calcolati per i pozzi analizzati. Dall'esame della tabella emerge che, indipendentemente dalle litologie e dalla profondità, i pozzi caratterizzati da maggiore soggiacenza sono contraddistinti da un valore più basso di conducibilità termica verticale: ciò suggerisce che il valore di conducibilità termica è strettamente influenzato dalla saturazione dei terreni.

Codice Pozzo	Profondità pozzo [m]	Località	Soggiacenza media della falda [m]	Kz [W/°C·m]
1	50.00	Cirié	19.55	0.78
2	55.00	Leini	5.50	1.33
3	35.00	Venaria	17.70	0.63
4	20.00	San Maurizio Canavese	3.22	1.21
5	20.00	Volpiano	4.25	1,08
6	20.00	Villanova Canavese	3.15	1.24
7	20.00	Caselle Torinese	9.54	1.04
8	15.00	Lanzo Torinese	3.45	1.93

Tab.1 - Parametri per la determinazione del calcolo della conducibilità termica verticale equivalente.

4.3.2 Stima della componente verticale della velocità

La determinazione della componente verticale della velocità della falda è stata determinata in accordo col metodo proposto da YALCIN & DULMU (1998) e col modello elaborato per il Conoide di Lanzo (Fig. 5). Il calcolo della velocità della falda è stato effettuato su tutti i pozzi, indipendentemente dalle loro profondità, sia per la misure primaverili che autunnali al fine di effettuare delle valutazioni sulla ricarica degli acquiferi in relazione anche all'effetto stagionale.

Per il calcolo della velocità, sono stati esclusi i valori di temperatura riconducibili alle oscillazioni stagionali, ovvero le misure raccolte per profondità inferiori ai 15 metri, in accordo a quanto già segnalato in BARBERO *et al.*, 2014. Tale accorgimento è dovuto anche in ragione del fatto che se $T_0 > T_L$, il logaritmo nell'Eq. 14 non è determinabile. I valori di T_z e di z introdotti nell'Eq. 14 corrispondono alla miglior stima, ovvero alla media dei valori di temperatura per profondità maggiori di 15 metri. In Tab. 2 sono riportati i valori di velocità verticale autunnali e primaverili, il valor medio con i relativi ordini di grandezza per un rapido raffronto dei risultati.

L'equazione adottata per il calcolo della velocità è la seguente (16):

$$\langle v_z \rangle = \frac{K_z}{\rho_w c_w \langle z \rangle} \ln \frac{T_L - T_0}{T_L - \langle T_z \rangle} \quad (16)$$

L'esame della Tab. 2 evidenzia che, sebbene a livello stagionale vi siano talora differenze di un ordine di grandezza nel valore della velocità verticale v_z nei pozzi di Cirié e di Volpiano, per quasi tutti i pozzi non si osservano, invece, delle differenze significative nei valori medi di velocità verticale $\langle v_z \rangle$: ciò suggerisce che le variazioni di velocità (dedotte da misure termiche e pertanto influenzate dagli effetti stagionali) si compensano tra di loro. I bassi valori di velocità verticale ricavati sono probabilmente riconducibili alla litologia dei sedimenti e, in particolare, alla presenza di argilla nella matrice.

Codice Pozzo	Località	Velocità verticale v_z primaverile [m/s]	Velocità verticale v_z autunnale [m/s]	$\langle v_z \rangle$ [m/s]	$\langle v_z \rangle$ [m/anno]
1	Cirié	$7.5 \cdot 10^{-9}$	$3.2 \cdot 10^{-9}$	$5.3 \cdot 10^{-9}$	0.2
2	Leinì	$1.0 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{-8}$	$1.0 \cdot 10^{-8}$	0.3
3	Venaria	$1.7 \cdot 10^{-8}$	$2.5 \cdot 10^{-8}$	$2.1 \cdot 10^{-8}$	0.7
4	San Maurizio Canavese	$2.3 \cdot 10^{-8}$	$2.0 \cdot 10^{-8}$	$2.1 \cdot 10^{-8}$	0.7
5	Volpiano	$3.2 \cdot 10^{-8}$	$6.2 \cdot 10^{-8}$	$4.7 \cdot 10^{-8}$	1.5
6	Villanova Canavese	$1.0 \cdot 10^{-8}$	$1.0 \cdot 10^{-8}$	$1.0 \cdot 10^{-8}$	0.3
7	Caselle Torinese	$3.0 \cdot 10^{-9}$	$3.4 \cdot 10^{-9}$	$3.5 \cdot 10^{-9}$	0.1
8	Lanzo Torinese	$2.1 \cdot 10^{-8}$	$3.3 \cdot 10^{-8}$	$2.7 \cdot 10^{-8}$	0.8

Tab.2 - Valori di velocità verticale della falda.

5. CONCLUSIONI

L'utilizzo di metodi analitici basati su soluzioni particolari di trasporto del calore per avvezione, applicati a semplici modelli idrogeologici e fisici del Conoide di Lanzo, ha consentito di ricavare informazioni quantitative sulla componente verticale della velocità della falda. L'analisi dei dati termometrici raccolti in pozzi per acqua, sviluppati all'interno dell'acquifero superficiale, ha consentito di determinare la componente verticale della velocità della falda superficiale e di stimare la ricarica riferita a quest'ultimo acquifero. L'uso di questa metodologia consente di individuare uno scorrimento verticale con valori di velocità dell'ordine delle decine di centimetri all'anno. In particolare sono stati calcolate velocità medio-basse (~ 10 - 30 cm/anno) presso Cirié, Villanova C.se, Leinì e Caselle T.se e valori più elevati (~ 60 - 100 cm/anno) presso Lanzo T.se, Volpiano, Venaria e San Maurizio.

Sebbene al momento non vi siano informazioni quantitative sulla velocità per l'intero apparato di conoide, questi primi risultati di velocità possono essere utilizzati per la stima dei tempi di ricarica degli acquiferi, oltre che essere utilizzati nel settore della idrogeologia ambientale per lo sviluppo di modelli idrogeologici concettuali, in cui introdurre un parametro dedotto sperimentalmente nella ricostruzione della circolazione idrica all'interno di mezzi porosi, finalizzati allo studio della dispersione di sostanze inquinanti. Una maggiore disponibilità di dati potrebbe consentire una più accurata stima della velocità e una più precisa suddivisione del Conoide in settori a diversa velocità.

BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON M.P., 2005 - Heat as a ground water tracer. *Ground Water*, 43(6), pp. 951-968.
- ARRIAGA M.A. & LEAP D.I., 2006 - Using solver to determine vertical groundwater velocities by temperature variations, Purdue University, Indiana, USA. *Hydrogeology Journal*, 14, pp. 253-263.
- BALESTRO G., SPAGNOLO G., LUCCHESI S., FIORASO G., FORNO M.G., CADOPPI P., TALLONE S., PICCARDO G.B. & POLINO R., 2009 - Foglio 155 "Torino Ovest" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. APAT, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici - Dipartimento Difesa del Suolo, Roma.
- BALSOTTI R., 2009 - Indagine piezometrica sui piezometri della rete di monitoraggio quantitativa regionale. Resoconto delle attività svolte, Arpa Piemonte.
- BARBERO D., DE LUCA A.D., FORNO M.G., LASAGNA M. & MAGNEA L., 2014 - Thermal characterization of shallow aquifer in the left sector of the Lanzo Fan (Piemonte region) for geothermal applications, in "The future of the Italian Geosciences - The Italian Geosciences of the future", Ed. Società Geologica Italiana - International Union of Geological Sciences, *Rend. Online Soc. Geol. It.*, 31, p. 570.
- BLASCH K.W., CONSTANTZ J. & STONESTROM D.A., 2007 - Thermal Methods for Investigating Ground-Water Recharge. USGS Professional Paper 1703. *Ground-Water Recharge in the Arid and Semiarid Southwestern United States*, Appendix 1, pp. 353-375.
- BOYLE J.M. & SALE Z.A., 1979 - Determination of recharge rates using temperature depth profiles in wells. *Water Resources Research*, 15(6), pp. 1616-1622.
- BORTOLAMI G.C., CREMA G., MALARODA R., PETRUCCI F., SACCHI R., STURANI C. & VENZO S., 1969 - Foglio 56 "Torino" della carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000, II^a ed., *Serv. Geol. It.*, Roma.
- BREDEHOEFT J.D. & PAPADOPULOS I.S., 1965 - Rates of vertical groundwater movement estimated from the Earth's thermal profile. *Water Research*, 1(2), pp. 325-328.
- CARTWRIGHT K., 1970 - Groundwater discharge in the Illinois Basin as suggested by temperature anomalies, *Water Resources Research*, 6(3), pp. 912-918.
- DE LUCA A. D., FORNO M. G., GREGORIO L. & VATTERONI R., 2007 - Stratigraphic reconstruction of the Lanzo Fan right sector applied to the groundwater research. *Geoitalia*, 6° Forum FIST, 2007, Riassunti, pp. 88-89.
- FORNO M.G., GREGORIO L. & VATTERONI R., 2009 - La successione stratigrafica del settore destro del Conoide di Lanzo e il suo significato per l'utilizzo del territorio. *Mem. Soc. Geogr. It.*, 87(I-II), pp. 237-247.
- NIMMO J.R., HEALY R.W. & STONESTROM D.A., 2005 - Aquifer recharge, in ANDERSON M.G. (ed.), *Encyclopedia of hydrological sciences*, John Wiley & Sons, New York, pp. 2229-2246.
- STRINGARI M., BALSOTTI R. & DE LUCA A.D., 2010 - Le caratteristiche termiche dell'aquifero superficiale della Regione Piemonte. *Acque Sotterranee*, 121, pp. 29-42.
- TANIGUCHI M. & SHARMA M.L., 1993 - Determination of groundwater recharge using the change in soil temperature. *Journal of Hydrology*, 148, pp. 219-229.
- YALCIN H.T. & DULMU O., 1998 - The estimation of vertical velocity of thermal water by use of temperature profile, Proceeding of the 20th NZ Geothermal Workshop, pp. 393-395.

